

Title	薄層化CFRP積層板の面外方向負荷に対する力学的特性および損傷形態についての研究(Abstract_要旨)
Author(s)	山田, 耕平
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2020-03-23
URL	https://doi.org/10.14989/doctor.k22437
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

京都大学	博士（工学）	氏名	山田 耕平
論文題目	薄層化 CFRP 積層板の面外方向負荷に対する力学的特性および損傷形態についての研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 積層板において面外方向からの負荷に対する CFRP 擬似等方積層板の薄層化が初期損傷の発生に及ぼす影響について明らかにすることを目的に、工学的な観点から研究した成果についてまとめたものであり、6 章からなっている。</p> <p>第 1 章は緒言であり、研究背景および本論文の目的を述べている。CFRP の損傷の発生を抑制する方法の一つに積層板を構成する層を薄くする薄層化がある。近年、厚さが 0.1 mm 以下と非常に薄い中間基材が工業的に実用化されたことから薄層化技術が注目され、CFRP の力学的特性の向上や適用範囲の拡大が期待されている。本論文では、面外方向からの負荷に対する薄層化 CFRP 擬似等方積層板の損傷挙動および力学的特性を明らかにし、薄層化によって面外負荷の損傷抑制を効果的に実現する方法を検討することを目的としている。</p> <p>第 2 章では、マトリクス樹脂にエポキシ樹脂と PA6 をそれぞれ用いた層厚さが異なる擬似等方性 CFRP 積層板を作製して曲げ試験を行い、薄層化およびマトリクス樹脂が曲げ特性および損傷形態におよぼす影響を評価した。試験中は試験片の端面をその場観察し、最終破壊前後の瞬間を高速度カメラで撮影することで詳細な損傷進展過程の調査を行った。その結果、層厚さを薄くすると、マトリクス樹脂がエポキシ樹脂、PA6 のいずれの場合でも、曲げ強度、曲げ弾性率が向上する効果を示した。これは、薄層化により隣接する層の拘束効果が高まり、最終破断にいたるまでトランスバースクラックおよび層間剥離の発生が抑制されたことによる。一方、この効果により層厚さが薄くなるとより脆性的な損傷挙動を示すことがわかった。層厚さ、マトリクス樹脂の違いにより、層間剥離の発生状況が異なっていたことから、層厚さと樹脂のじん性の違いがトランスバースクラックおよび層間剥離の発生および進展に影響することを明らかにした。特に、マトリクス樹脂のじん性が高くなると、より短い層間剥離が多数発生する傾向がみられたことから、高じん化によるさらなる損傷抑制効果の向上の可能性が示唆された。さらに、得られた実験結果について、積層板理論と破壊則を用いて初期損傷発生時の各層のその場強度を計算し、定量的に薄層効果を検証した。その結果、層厚さが薄くなると隣接する層の拘束効果が強くなり、各層のその場強度が向上することが示され、このことにより高い損傷抑制効果が発現することを明らかにした。</p> <p>第 3 章では、厚さ 0.02 mm の薄層 CF/epoxy プリプレグ用い、層厚さが異なる 3 種類の擬似等方性積層板を作製して衝撃試験を行い、薄層化が損傷形態および力学的特性におよぼす影響を評価した。衝撃試験では、与えるエネルギーの大きさを 3 水準設定して行い、衝撃エネルギーの差異がおよぼす影響についても詳細に検証した。また、衝撃試験後の試験片について X 線 CT を用いて試験片内部で発生した損傷を観察し、層厚さが損傷形態に及ぼす影響、特に層間剥離とその発生起点となるトランスバースクラックの板厚方向の発生状況、繊維破断の板厚方向の累積について詳細に検討した。その結果、薄層化の効果として、積層板を構成する層厚さが厚い場合では、衝撃負荷による損傷形態が層間剥離やトランスバースクラックが主体になるのに対して、層厚さが</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	山田 耕平
<p>薄くなるにつれて、損傷抑制効果が発現することにより繊維破断が主体の破壊形態に変化することがわかった。このことから、衝撃負荷下においても、薄層化による損傷抑制効果が発現することで、繊維破断を主体とするより脆性的な損傷形態を示すことが考えられた。この傾向は、第 2 章での静的曲げ負荷試験において見られた損傷形態の変化と同様である。これらの層厚さの違いによる損傷形態の変化は、衝撃試験の最大荷重の低下および荷重-変位曲線における急激な荷重の低下からも確認された。また、衝撃エネルギーの差異の影響については、衝撃後圧縮 (CAI) 試験の結果から、低衝撃エネルギー域では、薄層化により CAI 強度が高くなる傾向が見られたが、高衝撃エネルギー域では繊維破断の累積の度合が大きくなることにより、CAI 強度の低下の割合が大きくなる傾向を示した。これらの結果から、薄層化により発生の度合が大きくなる繊維破断を抑制することが CAI 強度向上に重要であるとの知見を得た。</p> <p>第 4 章では、第 2 章、第 3 章で得られた知見をもとに、衝撃試験において薄層の損傷抑制効果を維持しながら、高衝撃エネルギー域で発生する繊維破断を抑制することに着目した。各層の層厚さが異なるハイブリッド積層板および金属箔を用いたハイブリッド積層板を作製し、作製した積層板について衝撃試験および CAI 試験を行った。その結果、薄層・厚層ハイブリッド積層板においては、薄層の割合、位置を調整することで、層間剥離の発生位置や発生形態が変わり、これにより低衝撃エネルギー域での CAI 強度が変化することがわかった。また、金属箔ハイブリッド積層板においては、金属箔を表層に配置することで繊維破断や層間剥離の発生を抑制し、CAI 強度を向上できることがわかった。この結果は、層厚さの違いによって生じる損傷形態の特徴を板厚方向に任意に配置することで、第 2 章、第 3 章で示された薄層化による損傷抑制効果を発現しつつ、この効果がもたらすデメリットとなる脆性的な損傷挙動の発生度合いを緩和できる可能性を示している。また、金属箔ハイブリッド積層板の試験結果から、金属箔の塑性変形および破断により吸収エネルギーを大きくすることで、損傷発生箇所を限定できることを確認した。このことから、延性の高い金属材料と薄層を組み合わせることで、薄層化による損傷抑制効果を最大限に活かし、より信頼性の高い CFRP 構造材料を製造可能であることを示すことができた。</p> <p>第 5 章では、第 2 章で得られた曲げ試験の結果をもとに、薄層化による損傷抑制効果について異なる視点から検証を行った。具体的には、X 線 CT を用いた試験片内部の詳細な観察および CFRP 擬似等方積層板の 3 点曲げ試験を模擬した有限要素解析を実施し、積層板内部の応力分布を取得することで積層板の薄層化による損傷抑制効果を局所的かつ定量的に検討した。その結果、薄層化によりクラックの発生が抑制され、この効果により、薄層では繊維破断主体の損傷形態をとることを確認した。また、弾塑性有限要素解析により、引張側の最外 90° 層の応力を比較し、薄層化によりその場強度が向上していること、さらに自由端近傍の応力は厚層と比べて低くなっていたことを示し、薄層化によるトランスバースクラックの抑制効果を定量的に検証した。</p> <p>第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の主な初期損傷としてトランスバースクラックおよびこれを起点とした層間剥離が挙げられるが、これらの損傷の発生を抑制する方法の一つに積層板を構成する層を薄くする薄層化がある。近年、厚さが 0.1 mm 以下と非常に薄い中間基材が工業的に実用化されたことから薄層化技術が注目され、CFRP の力学的特性の向上や適用範囲の拡大が期待されている。本論文では、薄層化が力学的特性および損傷形態に及ぼす影響について明らかにする目的で、特に面外方向からの負荷に対する薄層化 CFRP 擬似等方積層板の損傷形態について詳細な検討を行った。また、負荷方式として、静的および動的負荷の両方の影響を調べ、より詳細に破壊のメカニズムを解明するとともに、薄層化による損傷抑制効果がもたらすデメリットを明らかにし、その改善策を提案した。

1) 層厚さの異なる CFRP 積層板について曲げ試験を行い、層厚さが薄くなると初期損傷の発生が抑制され、曲げ強度、曲げ弾性率が向上することを示した。一方、初期破壊抑制効果の発現により、脆性的な破壊挙動を示すことが判明した。また、マトリクス樹脂のじん性が高くなると、さらなる損傷抑制効果があることを明らかにした。

2) 衝撃負荷下においても、静的な面外負荷試験の場合と同様に、薄層化による損傷抑制効果が発現することで、繊維破断を主体とするより脆性的な損傷形態を示すことを明らかにした。衝撃後圧縮 (CAI) 試験の結果、高衝撃エネルギー域では繊維破断の累積の度合いが大きくなることにより、CAI 強度の低下の割合が大きくなる傾向を見出した。これらの結果から、薄層化により発生の度合いが大きくなる繊維破断の抑制が CAI 強度向上に重要であるとの知見を得た。

3) 薄層化の損傷抑制効果を最大限に活かす方法について提案した。具体的には、薄層を板厚方向に任意に配置する方法と延性の高い金属材料を組み合わせる方法について効果の検証を行った。その結果、薄層の割合、位置を調整すること、金属材料を表層に配置することで繊維破断の発生や層間剥離の発生を抑制し、CAI 強度を向上できることを明らかにした。

4) 3 点曲げ試験を模擬した有限要素解析を実施した結果、薄層化によりその場強度が向上していること、自由端近傍の応力は厚層と比べて低くなっていたことから、薄層化によるトランスバースクラックの抑制効果を定量的に検証した。

以上のように本論文は、薄層化による面外方向からの負荷に対する損傷抑制効果およびこの効果が積層板の力学的特性および損傷形態に及ぼす影響を実験的に明らかにするとともに、薄層化もたらすデメリットの改善策を提案しており、得られた成果は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 2 年 2 月 17 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。